

文章编号: 1001-3806(2012)04-0527-05

## 激光淬火基体对镀铬层界面剪切强度的影响

张国祥 姚东伟

(江海职业技术学院 机电工程系 扬州 225101)

**摘要:** 为了揭示激光淬火预处理基体提高镀铬身管寿命的机理,采用多裂纹拉伸技术分别对激光淬火处理和激光未处理基体上的镀铬层界面剪切强度进行了测量,发现激光淬火基体可以提高镀铬层界面剪切强度77.7%,并从基体与铬层的界面材料结构和力学两个方面进行了分析。结果表明,激光预处理的界面是连续过渡的,而原始基体的界面存在一个过渡;激光淬火基体表面残余压应力的存在提高了铬层的断裂应力;基体表面硬度的提高减小了最大裂纹间距。

**关键词:** 激光技术;激光淬火;镀铬层;界面剪切强度;多裂纹拉伸法;残余压应力;硬度

**中图分类号:** TN249;TG156.33 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.04.024

### Effect of laser-quenching substrate on interfacial shear strength of chromium plated coatings

ZHANG Guo-xiang, YAO Dong-wei

(Department of Mechanical & Electrical Engineering, Jianghai Polytechnic College, Yangzhou 225101, China)

**Abstract:** Based on the real condition that laser quenching steel substrate could improve the service life of chromium-plated gun bore, the interfacial shear strengths of Cr-plating coating on laser re-quenching substrate and laser non-treating one were measured by multi-cracks tensile method respectively. The experimental results show that the interfacial shear strength is increased by 77.7% through laser re-quenching steel substrate. The analysis of interface structure between substrate and Cr-coating shows that the interface of laser pretreatment is a continuous transition, while there is an over-layer on the original interface. The mechanical model analysis shows that the compressive residual stress in the laser processing zone could increase fracture stress of chromium coating and the improvement of substrate surface hardness decreases maximum crack spacing. The synthetic result of above two effecting factors is that the interfacial shear strength is increased by laser re-quenching substrate.

**Key words:** laser technique; laser quenching; Cr-plating coatings; interfacial shear strength; multi-cracks tensile method; compressive residual stress; hardness

## 引言

由于铬的低摩擦系数和高熔点以及耐腐蚀等优点,采用镀铬方法对身管基体进行防护成为提高身管寿命的主要手段,然而延缓铬层从基体上剥落成为提高镀铬身管寿命的关键难题<sup>[1-2]</sup>。为了提高镀铬身管寿命,CHEN等人提出了激光淬火预处理基体提高镀铬身管的方法<sup>[3]</sup>。经过实际身管解剖分析表明<sup>[3-5]</sup>:激光预处理基体提高镀铬身管寿命的主要机理是改变了铬层界面微观结构以及铬层的表面形貌,但没有对界面结合强度进行实验室测定。

依据身管镀铬层的剥落是界面剪切失效机制的原理<sup>[1-2]</sup>,利用界面剪切强度评价激光淬火基体对镀铬层

抗剥落能力的影响是否符合身管镀铬层的实际情况。为此,本文中提出利用平行界面加载的多裂纹拉伸技术,对激光淬火基体对镀铬层的界面剪切强度的影响进行评价,并对影响界面剪切强度的因素进行分析。

## 1 试件制备和主要设备

### 1.1 试件制备

1.1.1 初始试件制备 试验材料是退火态的30CrNi<sub>2</sub>MoVA,将待处理表面利用水砂纸从200#开始一直研磨到2000#为止,在表面涂覆吸光材料,利用500W的YAG激光器对其表面进行扫描处理。其处理工艺参量如下:功率为200W,扫描速率为410mm/min,光斑直径为0.5mm。进行搭接扫描处理。对激光淬火和激光未处理基体表面再进行水砂纸研磨和抛光,按照H/PJ130101-2标准进行镀前处理和镀铬,得到厚度为50μm的铬层,其激光处理的铬层结构如图1所示。

作者简介:张国祥(1963-),男,副教授,研究方向为激光表面工程与界面力学。

E-mail: zgx20021@sina.com

收稿日期:2011-11-04;收到修改稿日期:2011-12-15

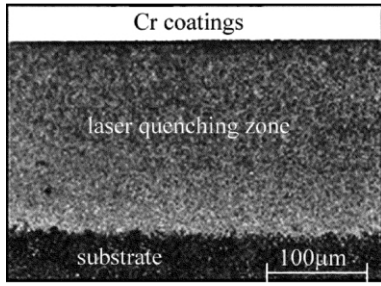


Fig. 1 Structure of Cr-plated coatings on laser quenching substrate

1.1.2 拉伸试件制备 利用线切割设备,先将试件切割成如图 2 所示的 1.5mm 厚的板状拉伸试件,再进行手工磨制到 1mm,在制备过程中,避免试件发生变形和表面损伤。激光淬火处理和未处理的试件每组各 10 个。

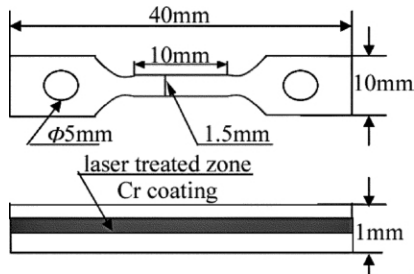


Fig. 2 Schematic diagram of tensile sample dimension

1.2 试验设备

采用型号为 Instron Microtester 5848 微拉伸试验机。将拉伸台置于带有 CCD 装置的光学显微镜下进行拉伸过程原位观察,拉伸台可以随显微镜载物台运动。具体试验装置如图 3 所示。

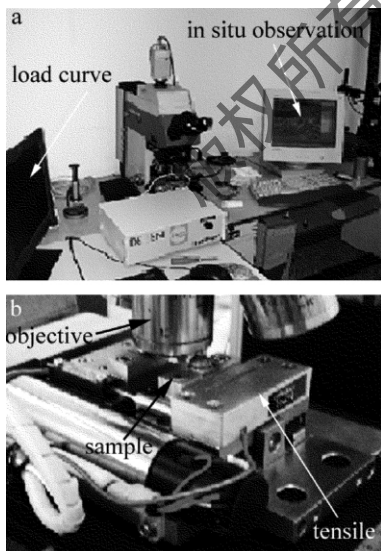


Fig. 3 Tensile setup with in situ observation

a—overall setup tensile stage b—local observing location with sample

2 实验结果

利用上述具有原位观察功能的微拉伸试验机,加载方式为控制位移法,加载速率为 0.1mm/min。得到

如图 4、图 5 所示的典型拉伸应力-应变曲线和铬层表面平行多裂纹。图 4 中曲线 A 和曲线 B 分别对应激光淬火处理和未处理基体的铬层/基体结构应力-应变曲线。

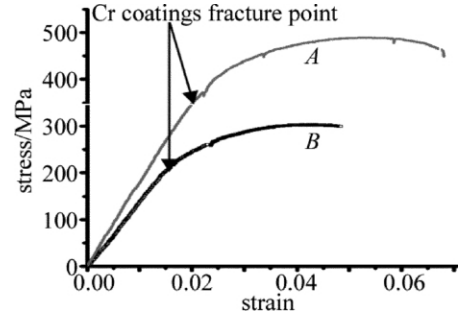


Fig. 4 Typical stress-strain curve

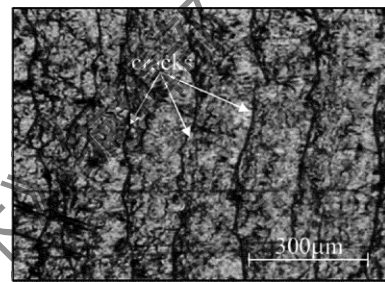


Fig. 5 Multi-cracks morphology on Cr coating surface

在拉伸过程中,原位观察监视器出现第 1 条铬层表面裂纹时,记录应变值。接着继续拉伸,当裂纹的条数不再增加时,即铬层表面裂纹达到饱和时,停止试验,拍摄铬层表面裂纹形貌,对每个试件裂纹间距进行统计,求出裂纹间距平均值。最大裂纹间距<sup>[6]</sup>为:

$$L_{max} \approx \frac{4}{3}L_{avg} \quad (1)$$

式中  $L_{max}$  和  $L_{avg}$  分别是裂纹饱和时的最大裂纹间距和平均裂纹间距。对每组 10 个试件数据进行平均,得出铬层出现第 1 条裂纹时的断裂应变和裂纹饱和时的裂纹平均间距,如表 1 所示。表 1 中  $\epsilon_f$  表示铬层断裂应变。

Table 1 Experimental data

	$\epsilon_f / \%$	$L_{avg} / \mu m$	$L_{max} / \mu m$
laser	$0.23 \pm 0.01$ $0.02$	$272.3 \pm 11$ $13$	$363 \pm 14.7$ $17.3$
original	$0.17 \pm 0.02$ $0.04$	$257 \pm 5$ $9$	$476 \pm 6.7$ $12$

由于铬层和钢基体分别属于脆性和塑性材料,利用适用于脆性涂层/塑性基体的多裂纹拉伸技术测量界面所承受的最大剪切应力,以此作为界面剪切强度<sup>[7]</sup>,具体测量公式如下:

$$\tau_{max} = \frac{\pi b_c \sigma_f}{L_{max}} \quad (2)$$

式中  $b_c$ 、 $\sigma_f$  和  $\tau_{max}$  分别为铬层厚度、铬层断裂应力和最大界面剪切应力。铬层断裂应力为:

$$\sigma_f = E_c \epsilon_f \quad (3)$$

式中  $E_c$  是铬的弹性模量,取  $E_c = 280\text{GPa}$ <sup>[8]</sup>。由于本文中主要反映激光淬火基体对铬层界面剪切强度的影响,故不考虑统计偏差对计算数据的影响。将表 1 中的铬层断裂应变平均值带入(3)式,得到基体激光淬火处理和未处理的铬层断裂应力分别为 644MPa 和 476MPa。

分析(2)式可知:在涂层厚度  $b_c$  一定的情况下,若要提高界面剪切强度,一是增加涂层断裂应力  $\sigma_f$ ;二是减小最大裂纹间距  $L_{\max}$ 。由表 1 中给出的最大裂纹间距和上述计算的铬层断裂应力可知:激光淬火处理基体不但减小了最大裂纹间距,而且也提高了铬层的断裂应力,为此提高了铬层的界面剪切强度。

将铬层厚度  $b_c$  和饱和时的最大裂纹间距  $L_{\max}$  的平均值以及铬层的断裂应力  $\sigma_f$  带入(2)式,得到了与激光淬火处理和未处理基体相对应的界面剪切强度分别为 278MPa 和 157MPa,激光淬火处理和未处理基体的相比,界面剪切强度提高了 77.7%。

### 3 实验结果分析

#### 3.1 激光淬火基体组织分析

为了揭示激光淬火预处理基体对镀铬层界面的影响,采用同样的激光预处理工艺对 30CrNi<sub>2</sub>MoVA 基体进行离散淬火处理,对镀铬试件经过抛光后,用 3% 的硝酸酒精进行腐蚀,再利用扫描电子显微镜拍摄图片,得到如图 6 所示的离散基体表明结构图。图 6 表明,激光淬火处理区域与原始区域有明显的区别。



Fig. 6 Interface structure of chromium plated on substrate for laser discrete pretreatment

为了进一步分析其区别,对激光预处理区域与原始区域界面处进行放大,得到图 7。图 7 表明,激光淬火预处理的区域的晶粒明显小于原始基体的。根据硬度与晶粒直径的关系,激光处理区的硬度应大于原始基体的。

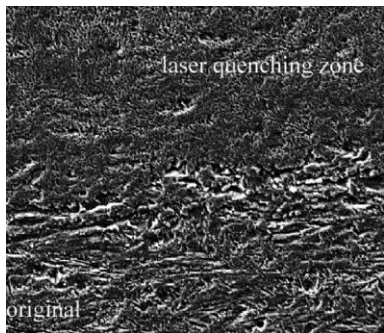


Fig. 7 Comparison between laser-treated zone and original zone

#### 3.2 激光处理基体对界面结构影响

对与拉伸试验同样的试件进行磨、抛光后,采用与研究界面结构同样的离子冲击参量<sup>[4]</sup>,对激光淬火和原始基体的镀铬层界面进行离子束刻蚀,得到图 8。图 8a 表明,在原始基体和镀铬层之间存在一个过渡层,该过渡层与基体和其它铬层形成了两个界面,在离子冲击作用下,在界面处形成了细小的“狭缝”,这说明在界面附近存在一个弱强度区,该区的材料被具有一定能量的离子剥落掉;图 8b 表明,激光淬火的基体和铬层之间没有过渡层存在,铬层和基体之间仅存在一个界面,并且在界面处,基体和铬层连续过渡,没有形成“狭缝”,这说明激光淬火基体的界面附近不存在弱强度区。

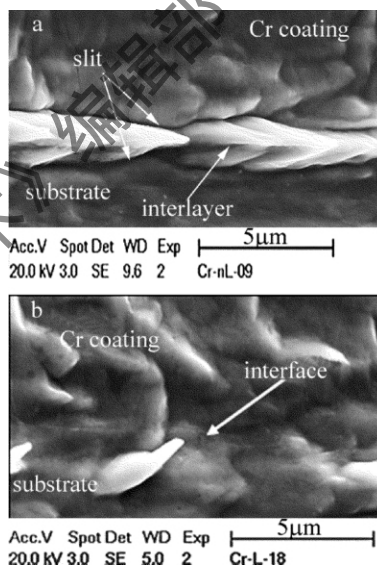


Fig. 8 Comparison of interface morphological

a—morphological characters of original substrate interface b—morphological characters of interface of laser quenching substrate

#### 3.3 激光处理区硬度分布分析

利用 50g 的载荷、保压时间为 15s,测量沿深度方向变化的维氏硬度值,测量结果如图 9 所示。图 9 表明,在激光处理区内,形成沿深度方向呈递减趋势的硬度梯度。在原始基体区内硬度呈常数分布,即没有硬度梯度。并且表面硬度(650HV)是原始基体的(300HV)2 倍多。这也验证了晶粒细化可以提高硬度

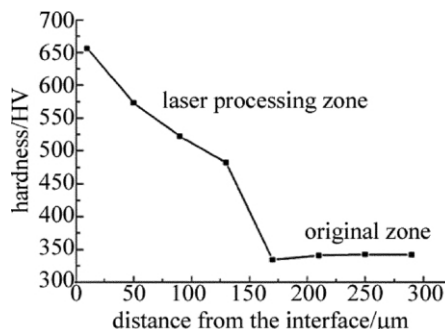


Fig. 9 Hardness gradient of the laser treatment area

的原则。

### 3.4 基体表面残余压应力影响

试验结果表明,激光淬火基体能够提高铬层断裂应力,其原因是,由于激光淬火作用,在基体表面(镀铬后变成基体界面)上形成了残余压应力(压应变)<sup>[9]</sup>,该残余压应力(压应变)具有抵抗外载荷拉伸作用,则等效拉应变由两部分组成,一是先消除残余压应变的外载拉应变,即将压应变复零的附加拉应变;二是没有残余压应力时的外载拉应变,则等效拉应变为:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_{\text{app}} + \varepsilon_r \quad (4)$$

式中  $\varepsilon_{\text{eff}}$ 、 $\varepsilon_{\text{app}}$  和  $\varepsilon_r$  分别为等效拉应变、激光未处理基体的外载拉应变和残余压应变(正值)。

表1中给出的激光淬火基体的铬层断裂拉应变  $\varepsilon_f$  大于激光未处理基体的结果也证实了(4)式的结论。

在单向拉伸时的残余压应力和残余压应变的关系为:

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E_s} \quad (5)$$

式中  $\sigma_r$  和  $E_s$  分别是激光处理区的残余压应力和基体的弹性模量。

在拉伸过程中,涂层和基体在界面处的应变应相等<sup>[7]</sup>,则利用(3)式可得铬层断裂应力为:

$$\sigma_{f1} = E_c \varepsilon_f = E_c \varepsilon_{\text{eff}} = E_c (\varepsilon_{\text{app}} + \varepsilon_r) \quad (6)$$

将(5)式代入(6)式,得到如下表达式:

$$\sigma_{f1} = E_c \varepsilon_{\text{app}} + \frac{E_c}{E_s} \sigma_r \quad (7)$$

式中  $\sigma_{f1}$  是与激光淬火基体相对应的铬层断裂应力。对于激光未处理基体情况,由于没有残余压应力(应变)的存在,则(7)式变成:

$$\sigma_f = E_c \varepsilon_f = E_c \varepsilon_{\text{app}} = E_c \varepsilon_{\text{app}} \quad (8)$$

比较(7)式和(8)式可知,激光淬火基体的铬层断裂应力要比未经激光处理的基体附加了一个基体残余压应力影响项,故铬层断裂应力得到了提高。

### 3.5 基体表面硬度的影响

试验结果表明,激光淬火基体的最大裂纹间距小于未经激光处理的基体,其原因是,当铬层第1条裂纹出现时,由于铬层是脆性材料,裂纹很快就扩展到了界面。由于裂纹尖端处存在着应力奇异性,为此,裂纹尖端处的基体材料发生塑性变形,此时残余压应力得到释放。如果基体材料的屈服强度是  $\sigma_y$ ,则通过基体界面可传递的剪切应力为<sup>[10]</sup>:

$$\tau = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

由于激光淬火基体提高了基体表面的硬度,根据屈服强度是硬度1/3原理<sup>[11]</sup>,则基体表面屈服强度也相应

地得到了提高,则由(9)式可有:

$$\tau = \frac{H}{3\sqrt{3}} \quad (10)$$

式中  $H$  为基体表面硬度。(10)式表明,提高基体表面的硬度,可以增加界面传递的剪切应力。

如图6所示,分析距裂纹  $x$  处的铬层横截面拉应力,取长度为  $x$  的铬层为受力分析单元。考虑该分析单元力平衡条件,并将(10)式带入可得:

$$\sigma = \frac{\tau x}{b_c} = \frac{Hx}{3\sqrt{3}b_c} \quad (11)$$

(11)式表明,当铬层厚度  $b_c$  和距离  $x$  一定的情况下,增加基体的硬度,则增加了铬层所受的拉应力  $\sigma$ ,当拉应力达到铬层断裂应力时,铬层断裂,形成新的裂纹。则裂纹间距  $x_f$  与硬度之间的关系为:

$$x_f = \frac{3\sqrt{3}b_c\sigma_f}{H} \quad (12)$$

(12)式表明,当铬层厚度一定时,增加铬层的断裂应力可以加大裂纹间距,而增加基体的硬度则可以减小裂纹间距。尽管激光淬火基体可以提高铬层的断裂应力,但实际测量表明,激光淬火基体得到的最大裂纹间距仍然小于激光未处理的,则说明基体硬度减小裂纹间距的能力强于铬层断裂应力加大裂纹间距的能力。

通过上述激光淬火区的残余压应力和硬度对实验现象讨论可知:残余压应力存在和硬度的提高分别提高了铬层断裂应力和减小了最大裂纹间距。

## 4 结论

通过平行界面的多裂纹拉伸技术测量表明,激光淬火处理基体可以提高镀铬层的界面剪切强度。其提高的机理是:

(1) 激光预处理基体改变了界面结构,激光预处理的从基体到铬层是连续过渡的,而原始基体的存在一个过渡层。

(2) 激光淬火基体导致基体表面残余压应力的存在,通过增强基体的抗拉伸能力,缓解了基体向铬层传递应力的能力,表现为提高了铬层断裂应力。

(3) 激光淬火基体提高了基体表面的硬度(屈服强度),通过增加基体界面可传递的剪切应力,加大了铬层所受的拉应力,表现为减小了最大裂纹间距。

(4) 基体表面残余压应力的存在和硬度的提高共同作用结果导致了铬层界面剪切强度得以提高。

## 参考文献

- [1] UNDERWOOD J H, TROIANO E. Critical fracture processes in army cannons: a review [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2003, 125(3): 287-292.

- [2] UNDERWOOD J H , PARKER A P , VIGILANTE G N , *et al.* Thermal damage , cracking and rapid erosion of cannon bore coatings [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology* , 2003 , 125( 3) : 299-304.
- [3] CHEN G N , LUO G X , ZHANG K , *et al.* A new method for improving service life of chrome-plated gun barrels by laser strengthening [J]. *Acta Armamentaria* 2003 24( s1) : 6-10( in Chinese) .
- [4] XU X Y , ZHANG K , CHEN G N , *et al.* Influence of laser hardening substrate on microstructure and bonding of electroplating chromium coating[J]. *Chinese Journal of Lasers* , 2006 , 33( 3) : 413-416( in Chinese) .
- [5] ZHANG G X. Effect of laser quenched substrate on the surface morphology of Cr-plating coatings [J]. *Laser Technology* , 2011 , 35( 6) : 752-755( in Chinese) .
- [6] VINCI R P , VLASSAK J J. Mechanical behavior of thin films [J]. *Annual Review of Materials Science* , 1996 , 26: 431-462.
- [7] YANAKA M , TSUKAHARA Y , NAKASO N , *et al.* Cracking phenomena of brittle films in nanostructure composites analysed by a modified shear lag model with residual strain [J]. *Journal of Materials Science* , 1998 , 33( 8) : 2111-2119.
- [8] HOLZARTH U , STAMM H. Mechanical and thermomechanical properties of commercially pure chromium and chromium alloys [J]. *Journal of Nuclear Materials* 2002 , 300( 2/3) : 161-177.
- [9] OBERGFELL K , SCHULZE V , VOHRINGER O. Classification of microstructural changes in laser hardened steel surfaces [J]. *Materials Science and Engineering* 2003 , A355( 1/2) : 348-356.
- [10] HU M S , EVANS G A. The cracking and decohesion of thin films on ductile substrates [J]. *Acta Metallurgica* , 1989 , 37( 3) : 917-925.
- [11] TABOR D. Hardness of metals [M]. London , UK: Oxford at the Clarendon Press , 1951: 166.

· 简 讯 ·

## 流体直接冷却固体激光器实现激光输出验证

流体直接冷却薄片型固体激光介质是美国通用原子公司“液体激光器”方案的核心思想,是固体激光实现十万瓦级高功率输出的有效途径。固液表面损耗、液体流场影响以及腔体附加损耗等,是此类激光器所面临的新问题。2012年5月中旬,清华大学的流体直接冷却固体激光器进行了首次整机实验,实现了激光输出。近日,该激光器在调制模式工作下的峰值功率达到了1.2kW,激光光束的近场分布均匀。实验初步验证了流体直接冷却激光器的流场设计、高增益设计、腔体结构和大面积均匀抽运的可行性,得到了较为满意的结果,积累了大量实验数据。据查,这是国内首次公开报道此类激光器的研究成果。

( 巩马理、柳 强、闫 平供稿)